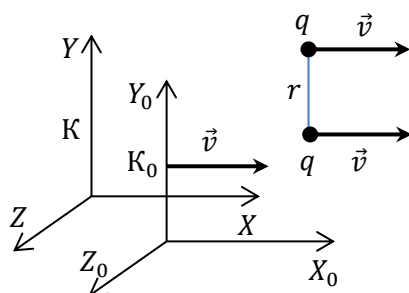


# МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ: РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭФФЕКТ В МИРЕ НИЧТОЖНЫХ СКОРОСТЕЙ

Согласно представлениям современной физики, магнитное взаимодействие зарядов вызвано их движением. Этот факт вполне способен осознать вдумчивый школьник. Однако даже среди учителей физики зачастую нет полного понимания причин вопиющего по меркам механики Ньютона явления под названием «магнитное взаимодействие». Давайте, попробуем разобраться. После великих переворотов, произошедших в науке XX века, противоречием с законами Ньютона читателя, конечно, не удивишь. Современным обобщением классической механики, сводящим ее до, пусть важного, но все же предельного случая является теория относительности. Исходя из общих свойств пространства—времени, следующих из постулата о постоянстве скорости света, специальная теория относительности, дополненная законом сохранения релятивистского импульса, становится основой релятивистской динамики. И это имеет далеко идущие последствия. Дело в том, что, в силу неприменимости в релятивистском случае классического закона сложения скоростей, а также относительности течения времени, ускорение тела перестает быть инвариантом в инерциальной системе отсчета, а, значит, и второй закон Ньютона приходится серьезно редактировать. Тогда и сила взаимодействия, являющаяся полным инвариантом в классической механике, может перестать быть им в теории относительности, в этом случае действие тел друг на друга будет зависеть от выбора нами системы отсчета. Это в частности означает, что сила взаимодействия двух движущихся вдоль параллельных прямых точечных зарядов будет отличаться от таковой в системе отсчета, где эти заряды неподвижны. Релятивистская динамика дает точный закон преобразования сил, и все, что мы знаем о магнитном поле, не может противоречить этому закону. Стало быть, магнитное взаимодействие зарядов должно иметь чисто релятивистское истолкование, и ничего иного здесь быть не может!

Уяснив, на качественном уровне, данный факт, перейдем к его количественному рассмотрению. Ограничимся все тем же частным случаем двух одинаковых зарядов, векторы скоростей которых равны в рассматриваемый момент времени. Пусть, кроме того, скорости зарядов перпендикулярны отрезку, соединяющему заряды. На этом частном случае проще всего уловить идею описания, принципиально она будет той же, что и в общем случае. Обозначим через  $K$  и  $K_0$  системы отсчета, в которых заряды, соответственно, движутся и неподвижны (см. рис.). Таким образом, в системе  $K_0$  взаимодействие зарядов подчиняется закону Кулона, и соответствующие силы коллинеарны оси  $Y_0$ .



Энергия и импульс заряда образуют 4-вектор  $\left(\frac{W}{c}; \vec{p}\right)$  компоненты которого, при переходе из  $K_0$  в  $K$  изменяются согласно преобразованиям Лоренца. В частности

$$p_x = \frac{p_{x_0} + \frac{v}{c^2} W_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1, a)$$

$$p_y = p_{y_0} \quad (1, б)$$

Далее, согласно основному уравнению релятивистской динамики, сила, действующая на один заряд со стороны второго, определяется соотношением:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (2)$$

где

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

— релятивистский импульс заряда. Тогда, учитывая (1, б), для  $Y$ -проекции силы имеем:

$$F_y = \frac{dp_y}{dt} = \frac{dp_{y_0}}{dt_0} \frac{dt_0}{dt}, \quad (4)$$

Где  $dt_0$  — время, за которое произошло изменение импульса в системе  $K_0$ . Связь между  $dt$  и  $dt_0$  вытекает из преобразований Лоренца:

$$dt_0 = \frac{dt - \frac{v}{c^2} dx}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Тогда

$$\frac{dt_0}{dt} = \frac{1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Этого и следовало ожидать, как как  $dt_0$ , очевидно, является собственным временем. Таким образом, связь между  $Y$ -проекциями сил взаимодействия зарядов в системах  $K$  и  $K_0$  выражается соотношением:

$$F_y = F_{y_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (5)$$

Аналогично связаны  $Z$ -проекции, но, поскольку  $F_{z_0} = 0$  то и  $F_z = 0$ . Не появится в системе  $K$  и проекции на ось  $X$ . Показать это можно следующим образом. Для  $X$ -проекций силы, аналогично (4), можно записать:

$$F_x = \frac{dp_x}{dt_0} \frac{dt_0}{dt}. \quad (6)$$

Согласно (1, а)

$$\frac{dp_x}{dt_0} = \frac{F_{x_0} + \frac{v}{c^2} \frac{dW_0}{dt_0}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (7)$$

Первое слагаемое в числителе правой части здесь равно нулю, а для второго применим теорему о кинетической энергии

$$\frac{dW_0}{dt} = \vec{F}_0 \vec{v}_0$$

Но  $\vec{v}_0$  — это скорость заряда в системе  $K_0$ , стало быть, она тоже равна нулю. Таким образом, правая часть (7), а, значит, и (6) действительно равна нулю. В итоге мы приходим к векторному равенству:

$$\vec{F} = \vec{F}_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (8)$$

Представим теперь релятивистский импульс заряда в псевдоньютоновой форме:

$$\vec{p} = m_p \vec{v},$$

где

$$m_p = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{W}{c^2}. \quad (9)$$

— так называемая релятивистская масса<sup>1</sup> частицы. Используя это удобное понятие, запишем следующую цепочку очевидных преобразований:

$$\vec{F} = \frac{d(m_p \vec{v})}{dt} = m_p \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm_p}{dt} = m_p \vec{a} + \frac{\vec{v}}{c^2} \frac{dW}{dt}. \quad (10)$$

Производная энергии заряда в правой части (10) снова таки, по соответствующей теореме, равна мощности действующей на заряд силы, но уже в системе  $K$ , причем

$$\frac{dW}{dt} = \vec{F} \vec{v} = 0, \quad (11)$$

поскольку  $\vec{F} \perp \vec{v}$ . Тогда, учитывая (8), (9), (10) и (11), имеем:

$$m \vec{a} = \vec{F}_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right). \quad (12)$$

Но

$$F_0 = k \frac{q^2}{r^2}$$

— сила кулоновского отталкивания зарядов. Как видим, в системе отсчета, где заряды движутся, сила стала меньше. Это можно интерпретировать, как появление в системе  $K$ , помимо отталкивающей силы, некоторой силы притяжения. Но именно такой должна быть, в данном случае, сила магнитного взаимодействия зарядов, если выводить ее из законов Био—Савара—Лапласа и Лоренца. Таким образом, качественное соответствие выводов релятивистской

<sup>1</sup> Раньше это понятие активно употреблялось, потом, кажется сначала в западной литературе, вышло из употребления. Среди отечественных физиков велись даже серьезные дискуссии, в пылу которых вроде серьезные люди доказывали, что понятие "релятивистская масса" лишено физического смысла. Мне кажется, смысла здесь лишена сама дискуссия, поскольку релятивистская масса — всего лишь удобное понятие как, впрочем, и другие понятия физики.

динамики и классической теории магнетизма уже имеет место. Осталось завершить рассмотрение количественной стороны вопроса. Итак, мы получили:

$$F_{\text{маг}} = F_0 \frac{v^2}{c^2} = \frac{k}{c^2} \frac{q^2 v^2}{r^2}.$$

Далее

$$\frac{k}{c^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2}} = 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}, \quad (13)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Теперь мы лучше понимаем, почему она столь мала: в мире «бытовых» скоростей магнитное взаимодействие — лишь малая релятивистская поправка к основному — кулоновскому взаимодействию зарядов. Тем не менее, в определенных случаях она может стать основной, но об этом чуть ниже.

Окончательное соотношение магнитного притяжения рассмотренных нами зарядов теперь имеет вид:

$$F_{\text{маг}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q^2 v^2}{r^2}, \quad (14)$$

что находится в полном соответствии с результатами классической электродинамики.

От (14), естественно, можно отщепить множитель

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv}{r^2}, \quad (15)$$

назвав его индукцией магнитного поля. Соотношение (15) представляет собой частный случай закона Био—Савара—Лапласа для точечного заряда. Тогда

$$F_{\text{маг}} = qvB, \quad (16)$$

— а это уже сила Лоренца. Применив (16) к проводнику, получим закон Ампера, на действии которого основана работа множества электротехнических устройств, окружающих нас повсеместно. Он замечателен тем, что представляет собой проявление теории относительности в областях скоростей дрейфа свободных зарядов в проводнике — весьма и весьма далеких от скорости света. Дрейфующие заряды берут не скоростью, а количеством. Более того, если проводник, что, как правило, имеет место, электронейтрален, только магнитное взаимодействие и будет наблюдаться, таким образом, релятивистский эффект из малой поправки превращается в основной и даже единственный. И наконец, поскольку наличие или отсутствие тока в проводнике никак не зависит от выбранной нами системы отсчета, этот, ставший основным, релятивистский эффект от выбора системы отсчета также зависеть не будет. Звучит очень странно, но, как видим, — это факт!